

## Магнитно-силовая микроскопия нанопроволок железа в полимерной матрице

С.А. Бедин<sup>1,2</sup>, Д.А. Бизяев<sup>3</sup>, А.А. Бухараев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт кристаллографии им. А.В.Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333, Москва, Россия  
bserg5@gmail.com*

<sup>2</sup> *Московский педагогический государственный университет, 119991, Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского РАН, 420029, Казань, Россия*

Методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) визуализированы нанопроволоки железа, сформированные электрохимическим осаждением в трековых каналах полимерной мембраны. Исследовано влияние внешнего магнитного поля различной ориентации по отношению к нанопроволокам на их МСМ изображения.

## Magnetic force microscopy of iron nanowires in a polymer matrix

S.A.Bedin<sup>1,2</sup>, Bizyaev<sup>3</sup>, A.A. Bukharaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" RAS, 119333, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Moscow pedagogical state university, 119991, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *The Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute RAS, 420029, Kazan, Russia*

Iron nanowires formed by electrochemical deposition in track channels of a polymer membrane were visualized by magnetic force microscopy (MFM). The effect of an external magnetic field of different orientations in relation to nanowires on their MFM images is studied.

Один из видов наноматериалов - нанопроволоки в последние годы привлекает к себе большое внимание. Интерес к этим объектам обусловлен как физическими эффектами, происходящими в таких 1D-структурах, так и возможностями разнообразных практических применений – сенсоры, устройства для считывания информации, а также для записи и хранения информации с высокой плотностью.

Одним из способов получения таких структур является метод матричного (темплейтного) синтеза, при котором требуемый материал осаждается в поры матрицы (с заданными параметрами), формируя множество нанопроволок (НП) [1-3]. В качестве ростовых матриц в настоящее время применяют пористый оксид алюминия (анодированный алюминий) и полимерные трековые мембраны (ТМ). Параметры получаемых НП определяются как характеристиками матриц, так и режимом их заполнения, и, следовательно, могут варьироваться в широких пределах [2]. Получаемые структуры (НП как из чистых металлов группы железа, так и их сплавы) изучены во многих работах. Однако работ по исследованию магнитных свойств отдельных НП очень мало. Изучению этого вопроса и посвящена настоящая работа.

В настоящей работе массивы НП из железа были получены на основе трековых мембран из полиэтилентерефталата с диаметрами пор 60 и 110 нм и поверхностной плотностью пор порядка  $10^8$  см<sup>-2</sup>, производства ОИЯИ, г. Дубна. Для получения НП использовался электролит следующего состава: FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O – 120 г/л; H<sub>3</sub>BO<sub>2</sub> – 45 г/л; аскорбиновая кислота – 2 г/л; лаурилсульфат натрия – 0,5 г/л; pH – 2,3; температура электролита 20-25°C. Осаждение проводилось в потенциостатическом режиме при напряжении на ячейке 1200 мВ [4,5].

Предварительная оценка полученных структур проводилась методом оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Основные микроскопические исследования проводились с помощью сканирующих зондовых микроскопов фирмы НТ-МДТ Solver P47 и Smena-A, работающих в режимах атомно-силовой микроскопии (АСМ)

и магнитно-силовой микроскопии (МСМ). За счет дооснащения микроскопов дополнительными магнитами были получены МСМ изображения, заглубленных в полимерную матрицу нанопроволок железа, как в отсутствие, так и при приложении внешнего магнитного поля. В работе использовались коммерческие магнитные кантилеверы марки N18/Co-Cr с покрытием из Co-Cr фирмы (MikroScience).

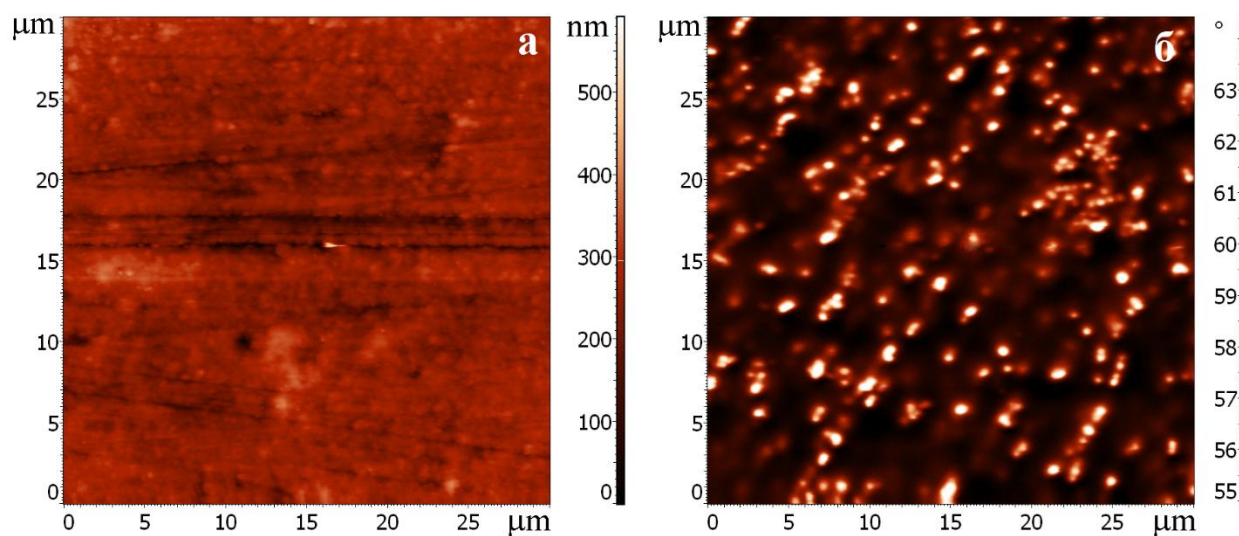


Рисунок 1. (а) АСМ изображение участка поверхности полимерной матрицы с треками диаметром 110 нм, заполненными железом;  
(б) МСМ изображение того же участка поверхности в магнитном поле 400 Э, направленном вдоль нанопроволок.

На АСМ изображения поверхности образца, представленном на Рисунке 1а, трудно различить нанопроволоки, так как они находятся внутри полимерной матрицы. В тоже время на МСМ изображении этого же участка поверхности фиксировался отклик от отдельных нанопроволок, расположенных вблизи поверхности, за счет высокого градиента магнитного поля на их концах. Использование внешнего магнитного поля вдоль легкой оси намагничивания нанопроволок значительно увеличивало однородность их намагниченности и приводило к формированию более высокого градиента на их концах. В результате на МСМ изображении появлялся контраст от нанопроволок, которые были заглублены в полимерной матрице (Рис. 1б). Изменение величины и направления внешнего поля приводило к трансформации МСМ изображений, связанных с перестройкой структуры намагниченности как в самих нанопроволоках, так и в используемых магнитных кантилеверах.

Таким образом, в работе показано, что метод МСМ позволяет детектировать отдельные магнитные нанопроволоки в толще полимерной матрицы и исследовать процессы их перемагничивания внешним полем.

Получение нанопроволок проведено при поддержке гранта РФФИ 15-08-04949.

1. А.Д. Давыдов, В.М. Волгин, *Электрохимия*, **52**, 905 (2016).
2. В.В. Коротков, В.Н. Кудрявцев и др., *Гальванотехника и обработка поверхности*, **19**, 23 (2011).
3. S.A. Ziganshina, A.P. Chuklanov et al., *Journal of Surface Investigation* **10**, 942 (2016).
4. S.A. Bedin, O.G. Rybalko et al., *Inorganic Materials: Applied Research*, **1**, 4, 359 (2010).
5. D.L. Zagorskiy, V.V. Korotkov et al., *Physics Procedia* **80**, 144 (2015).